近红外光谱技术在动物营养领域中应用的研究进展

冯　豆　滕战伟　梁美娟　高腾云*

(河南农业大学牧医工程学院，郑州 450002)

摘　要：传统饲料营养价值评定方法工作量大、效率低。随着信息技术的发展和化学计量学方法的应用，近红外光谱技术(NIRS)以其方便、快捷、无损的优点，被国内外学者广泛应用于动物营养领域的研究。本文对 NIRS 进行简单介绍，从饲料营养成分检测、饲料原料掺假鉴别、营养成分消化率预测等方面的研究进行综述，以期对 NIRS 在动物营养领域的推广和应用提供参考。

关键词：近红外光谱技术；动物营养；营养成分检测；掺假鉴别；消化率

中图分类号：　　文献标识码：　　文章编号：

在饲料营养成分检测时，传统湿化学方法对每个指标的检测方法各不相同，同时测定 1 种饲料的几种营养成分含量需要花费 1 周甚至更久时间。在饲料消化率测定时，通常采用体外试验、尼龙袋法、体内消化试验，但这些方法试验过程繁琐，且对试验动物要求较高。而随着科学技术和信息技术的发展，近红外光谱技术(near infrared reflectance spectroscopy，NIRS)被逐渐应用到饲料营养价值的评定中。

近红外光谱区自 1800 年被 Hershel 发现以来，随着相关光谱预处理方法和化学计量方法的不断改进，其快速、简便、实时检测的优点逐步凸显。目前，NIRS 研究已经深入农业领域[1-3]，并应用于动物营养方面的研究。

1 NIRS 简介

1.1 NIRS 的发展

收稿日期：2018-04-17

基金项目:现代奶牛产业技术体系建设专项资金资助（CARS-36）；2016 年河南省畜牧业专项补助资金－奶牛业发展（2015）236 号

作者简介:冯　豆（1991-），女，河南驻马店人，硕士研究生，从事反刍动物营养研究。

E-mail: 308167405@qq.com

*通信作者:高腾云，教授，博士生导师，E-mail: dairycow@163.com

20 世纪 50 年代 NIRS 被应用于分析农副产品成分，但由于信息技术的落后严重限制了 NIRS 分析仪器的发展[4]。20 世纪 60 年代，随着 NIRS 被应用于分析谷物中的水分含量，这种新颖、高效的技术被关注，得到巨大的发展空间[5]。20 世纪 80 年代后期，分析仪器向数字化迈进，同时随着化学计量学方法的应用，使提取光谱信息和消除背景干扰不再困难，NIRS 在样品测定中独树一帜，突破了原有的瓶颈，改变了人们对其光谱噪音较大、分析仪器技术低下的认知。20 世纪 90 年代，NIRS 全面应用于工业领域[6]，更好地服务于社会并且带来了可观的经济效益，NIRS 仪器的发展跨入大幅增长时代[7]。由于在定性和定量方面的良好表现，NIRS 在食品[8-9]、农业[10-11]、医药[12]、医疗[13]等领域中的研究趋于成熟。

1.2　NIRS 的原理

红外光是一种电磁波，波长范围位于可见光和微波区之间。波长 780~2 526 nm 的光谱区被美国材料检测协会(ASTM)定义为近红外光谱区。近红外光谱主要通过透射光谱(780~1 100 nm)技术和反射光谱(1 100~2 526 nm)技术获得[14]。在分子非谐振动能级跃迁时，产生近红外光谱，是分子共价化学键非谐振动的倍频和组合频。在近红外光谱测量中，主要由含 R-H 分子团(R 为 O、C、N 和 S)的吸收频率谐波和含氢基团 X-H(C-H、N-H、O-H)的倍频和合频的重叠产生，主要吸收含氢基团的倍频和组合频[15-16]。理论上，所有能产生近红外光谱的有机物质都能进行近红外分析，且所检样品不需要被破坏，直接由其本身所产生的光谱与相应的模型数据库比对分析，即可得到预测结果。NIRS 用于定量分析，效率比常规分析大大提高，是一种方便、快捷、无损的方式。NIRS 同样也可以应用于定性分析，利用光谱数据模式识别的原理，依赖于已有数据库的比对，在实际生产中多用于对质量的监控[17-18]。

1.3　NIRS 分析流程

NIRS 的流程主要分为校正模型的建立和未知样品的预测[19]，如图 1 所示。

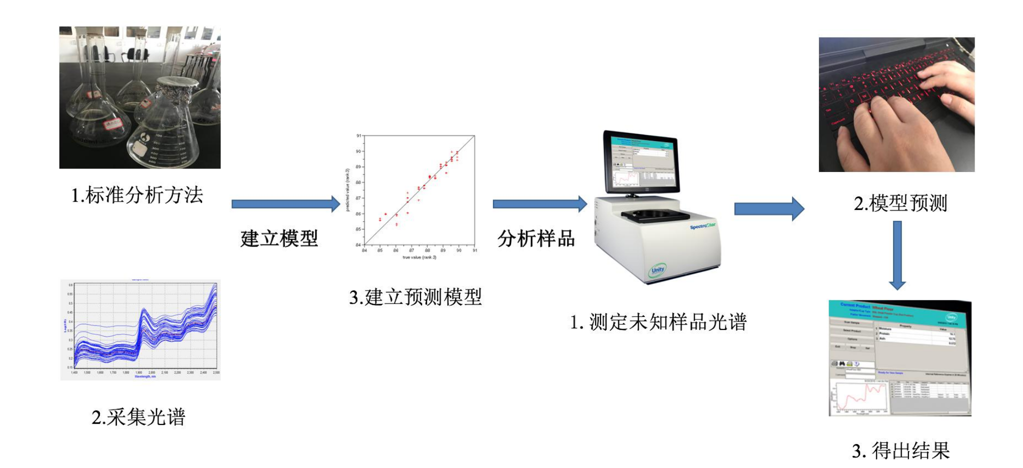


图 1　NIRS 分析流程

Fig.1　Analysis process of NIRS[20]

1.3.1　校正模型的建立

1）试验样品的采集。用于近红外模型建立的样品要具有足够的代表性，并且样本量要丰富，其化学组分需足以覆盖预测样品的所有范围。例如，建立天然植物样品模型时，要考虑到样品产地、生长季节、收获方式、贮存方式等[1]。

2）样本近红外光谱的收集。将采集的样品进行光谱的收集时，要尽可能即采即扫描，注意所有样品扫描参数的一致性。

3）样品指标的测定。利用标准的分析方法分析样品的基础数据。所有样品的基础数据必须保证准确，以免对整个模型的预测成功率造成影响[21]。

4）校准模型的建立。将扫描的光谱和利用经典分析方法测得的指标导入建模软件，进行光谱的预处理和化学计量学方法计算，将 2 部分数据进行关联，得到最初模型。

1.3.2　未知样品预测

1）光谱扫描。将未知样品处于和建模样品同样的条件下，进行光谱的收集。

2）预测。将光谱导入模型软件中，预测出样品的特定分析值。

2　NIRS 在动物营养领域的应用

随着现代信息技术的发展，饲料样品分析方法也在不断改进，趋向于更加方便、快捷、准确，而 NIRS 能满足这些要求，在饲料鉴别和营养成分分析应用上也愈加成熟。

2.1　饲料鉴别

2.1.1　动物骨粉饲料掺假鉴别

为了牟取利益，无良商家在动物骨粉中添加其他非法动物源性饲料，难以分辨真伪，而 NIRS 可通过样品光谱信息的不同，快速鉴别掺假情况。李琼飞等[22]将猪、鸡肉粉中掺入 0~48%牛、羊肉骨粉，分别建立近红外光谱模型，鉴别动物肉粉中是否掺杂反刍动物骨粉，最终得到准确率为 90%的模型，为动物骨粉的鉴别提供了可靠的方法。Yang 等[23]在鱼粉中掺入其他动物骨粉建立相关的近红外鉴别模型，成功区分出所有掺假的样品。动物骨粉掺假不仅影响动物生产，而且可能携带传染性病菌，危及动物健康，因此，将 NIRS 应用于动物骨粉掺假鉴别有重要意义。

2.1.2 蛋白质饲料掺假鉴别

为了提高饲料中粗蛋白质（CP）含量，有人在蛋白质饲料中掺入尿素等非法产品，增加了蛋白质饲料鉴别的困难性，而通过扫描饲料原料的光谱，利用光谱信息的不同区分掺假饲料与原饲料，能快速、准确鉴别饲料真伪。冯莉等[24]研究发现，通过 NIRS 能够准确、快速并且实时在线分析饲料中掺入尿素的含量，提高工作效率。然而孙丹丹等[25]分别建立 NIRS 和中红外技术模型，对掺假豆粕进行鉴别，结果显示，NIRS 模型预测集识别率为 99.2%，而中红外模型达到 100.0%，证明了在鉴别豆粕掺假尿素聚合物时，中红外光谱技术灵敏度高于 NIRS。Graham 等[26]利用 NIRS 和拉曼光谱分别建立了模型，结果证实，这 2 种方法都能成功快速检测植物油掺入其他矿物质。Haughey 等[27]对比了手持和台式近红外仪鉴别禽类饲料中掺入三聚氰胺的可能性，结果发现 2 种仪器测定系数均达到了 0.94~0.99，校正集和预测集相关系数分别达到了 0.081%~0.215%和 0.095%~0.288%。以上研究表明，NIRS 在区分蛋白质饲料和掺假饲料样品时，准确率能达到 94%以上，但仍需要进一步研究提升掺假饲料鉴别时相较于中红外光谱技术的灵敏度和手持式 NIRS 仪器的准确率。

2.1.3 霉变饲料鉴别

霉变是饲料贮藏过程中值得关注的问题，将 NIRS 应用于快速鉴定霉变饲料对于饲料原料用于动物生产具有重要意义。张强[28]构建了稻谷中霉菌和霉菌毒素快速检测的近红外光谱模型，成功定性和定量识别了稻谷中霉菌和霉菌毒素含量，并且设计了便携式分析仪，提供了一种全新、便捷的稻谷贮藏霉菌和霉菌毒素实时监测方法。Fernández-Ibañez 等[29]运用 NIRS，研究建立了玉米和小麦 2 种谷物中黄曲霉毒素 B_1 含量的鉴定模型。关于 NIRS 应用于饲料原料霉变的鉴别，NIRS 表现出良好的应用前景，但相关研究仅限于黄曲霉毒素，且鉴别准确度相对偏低，应深究其原因，扩大 NIRS 的应用范围。

2.2 饲料营养成分预测

2.2.1 常规营养成分预测

评价饲料营养价值，检测其中常规营养成分的含量是方法之一。对于 NIRS 应用于饲料中常规营养成分的预测，虽然已有相关国家标准，但国内外学者对其应用于具体原料中的检测效果依然进行了研究。在粗饲料预测模型中，预测 CP、粗纤维(CF)、中性洗涤纤维(NDF)、干物质(DM)含量的效果最好。王旭峰等[30]建立了快速分析饲料中 CF 含量的模型，验证集

与预测值之间的决定系数为0.940 2，标准分析误差为0.153 6%。聂志东等[31]建立了全国紫花苜蓿的干草营养指标检测NIRS模型，对于苜蓿干草的CP、粗灰分、NDF、ADF、酸性洗涤木质素（ADL）含量和干物质体外消化率（IVDMD)各项指标的交互验证系数、交互验证均方根、外部验证相关系数分别为0.953 88~0.990 19、0.345%~1.980%、0.963~0.990。薛祝林等[32]利用改进偏最小二乘法，建立了苜蓿草捆近红外预测模型，发现相对饲喂价值（RFV）和NDF、ADF、CP含量能准确预测，而半纤维素含量、IVDMD交叉验证分析误差较高，只能用于粗略分析。任卫波等[33]利用近红外指纹光谱技术，对20个耐盐性和敏盐性苜蓿进行分类鉴别，发现品种鉴别准确率达100%，表现指数达85.7%。薛丰等[34]利用NIRS建立了分析压片玉米的CP、NDF、ADF、粗脂肪（EE）含量的模型，发现除ADF含量外，其余成分含量都能准确预测。王燕妮等[35]将NIRS运用于植物源性饲料原料的研究，建立了菜籽粕、豆粕等8种饲料原料CP、EE、CF含量的分析模型，其中，CP含量的预测准确率最高，EE、CF含量也能满足分析需求。刘会影等[36]证明了NIRS在玉米秸秆纤维素和半纤维素检测中的可行性，为提高秸秆资源利用率提供了新型、快速、准确的方法。刘贤等[37]成功建立了秸秆青贮饲料的CP、DM、粗灰分、ADF、NDF、ADL、乳酸、乙酸、丙酸、丁酸、氨态氮（NH_3-N）含量和pH分析模型，结果表明，乳酸、乙酸、丙酸、丁酸相关系数小于0.08，其他指标多高于此。孙晓荣等[38]利用NIRS和聚类分析法，成功鉴别了不同种类淀粉，并发现利用12 500 ~4 000 cm^{-1}光谱范围扫描样品，样品分类准确率达100%。杨莉等[39]建立了预测乳清粉中CP、脂肪、粗灰分含量的NIRS模型，决定系数分别为0.977、0.938、0.988。Khaleduzzamana等[40]运用NIRS分析蛋鸡混合饲粮的营养成分，发现CP、EE、磷含量预测值和实际分析值之间的相关系数（R^2）>0.9，CF、钙含量的R^2>0.8。Hetta等[41]运用NIRS和近红外高光谱成像技术结合偏最小二乘法建立模型，预测饲用玉米的营养成分、形态特征及农艺性状，结果发现，CP、淀粉、水溶性碳水化合物含量和玉米果穗比例具有稳定的预测性。Bagchi等[42]建立了预测糙米和米糠经济和营养成分的近红外模型，发现改进偏最小二乘法是对于预测糙米的籽粒蛋白质、淀粉，米糠CP、原油、DM、粗灰分、CF含量的最适处理方法。Chen等[43]用NIRS建立了分析谷子营养成分的模型，结果发现碳水化合物、CP、EE含量的校正集的相关系数分别为0.94、0.92、0.70，预测集标准偏差分别为0.28、0.40、0.17。姜训鹏等[44]建立了大豆皮、小麦麸、甜菜粕等6种饲料样品不同饲料原

料 NDF 和 ADF 含量近红外模型，其中 ADF、NDF 含量模型的验证集决定系数分别为 0.985、0.963，预测标准误差分别为 1.82、1.63。刘玲玲等[45]利用基于光栅技术的近红外检测系统，建立了小麦品质近红外检测模型，证明了 NIRS 对小麦品质有良好的预测性、稳定性和重复性。车畅[46]将 NIRS 运用于豆粕 CP 含量的可行性进行了研究，发现预测集的预测值具有可靠性。综上所述，偏最小二乘法适用于饲料常规营养成分检测 NIRS 模型建立，不同饲料原料应用不同的光谱预处理方法才能达到最理想的预测效果。

2.2.2　氨基酸含量预测

饲料中氨基酸含量的预测，通常采用离子色谱转移法，该方法对仪器要求较高，且需要转换计算，而 NIRS 快速、方便，与传统方法相比发挥了较好的效果。李守学等[47]研究发现，运用不同物理状态下的 *L*-赖氨酸硫酸盐的近红外光谱和化学计量学方法进行模型建立，验证集决定系数为 0.952，对我国氨基酸盐快速分析具有重要意义。黄庄荣[48]建立了整粒棉籽营养成分的近红外分析模型，发现 17 种氨基酸具有较好的预测精度和稳定性。李楠[49]同样建立了大豆 CP、天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、甘氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、色氨酸含量的 NIRS 分析模型，证明了应用于大豆氨基酸和 CP 含量快速检测的可行性。李军涛[50]指出，运用 NIRS 快速检测玉米中氨基酸含量，除了色氨酸外，能预测 14 种氨基酸的含量，且其模型可靠性优于 CP 含量预测模型。由此可见，NIRS 对氨基酸含量快速检测意义重大。

2.2.3　不同模型之间的转移

NIRS 建模过程中受限于不同的仪器类型，不同模型之间通常转移困难，经过不同的计算方法矫正后能提高不同来源模型之间的适用性。丁柯等[51]为了探究不同近红外仪器光谱之间的兼容性，采用 3 种不同的光谱转移和校正方法，对预测饲料中 CP 含量的模型在 3 台不同仪器之间进行转移研究，结果显示，除蛋白粉在 3 种方法下无法进行模型间转移外，玉米、酒糟、鱼粉、菜籽粕都能进行良好的预测，极大拓宽了模型的适用性。刘贤等[52]探究了秸秆饲料 NIRS 模型在不同仪器之间的转移效果，运用了不用预处理方法的正交信号校正，结果显示，只有全局中心化预处理后的模型可以实现仪器之间的兼容。因此，为了实现和推广 NIRS 应用于动物生产，需要进一步提高模型之间的转移效果。

2.3　饲料营养成分消化率测定

2.3.1 反刍动物饲料消化率测定

将反刍动物粪便近红外光谱建立模型，可利用 NIRS 分析奶牛饲料营养成分的消化率。Johnson 等[53]利用粪便近红外光谱模型，预测肉牛饲粮营养成分特点、消化率和干物质采食量(DMI)，结果发现 CP 含量(R^2=0.90)预测集和验证集的 R^2 大于中性洗涤纤维(R^2=0.85)，预测的 DMI 的 R^2 为 0.67~0.69，对于试验期平均 DMI 和粪便收集期的 DMI，R^2 分别为 0.76 和 0.73。Decruyenaerea 等[54]发现运用粪便 NIRS 模型，能快速、简便地预测放牧奶牛干草体内 DM 消化率和 DMI。Decruyenaerea 等[55]运用相同的方法成功预测了反刍动物 DM 消化率，而饲料的自由采食量不能预测。Lyonsa 等[56]建立 NIRS 校正模型，准确预测了绵羊粪便粗灰分和 NDF 含量(R^2=0.9~0.8），ADF、木质素含量和饲料灰分采食量、干物质消化率能够被准确预测(R^2=0.8~0.7），DM、氮含量和 DMI、总能、总能摄入量、总能消化率不能被预测。Decruyenaere 等[57]建立粪便和饲料 NIRS 模型，准确预测了放牧反刍动物有机物质消化率和有机物质自由采食量。Mehtiö等[58]建立不同泌乳时期奶牛粪便 NIRS 模型，成功预测了饲粮消化率。Hassoun 等[59]发现将聚乙二醇作为粪便标记物，运用 NIRS 能预测放牧牛的 DMI。Jancewicz 等[60]建立了饲喂 65 种不同饲粮的牛粪 NIRS 模型，成功预测了粪便营养成分(淀粉、有机物、氮、NDF、ADF、ADL)含量，但不能运用于 EE 含量的预测。Villamuelas 等[61]采用 NIRS 成功预测了饲养牛粪便中 DM、有机物、CP、总能的营养成分和其消化率，但对于氮和 ADF 含量未能成功预测。所以，对于运用反刍动物粪便建立 NIRS 模型，预测营养物质消化率是可行的，但是对 DMI、GE 消化率预测效果不佳，仍然需要进行动物试验。

2.3.2 单胃动物饲料消化率测定

利用 NIRS 预测饲料消化率，不仅应用于反刍动物，在水产及单胃动物上也有所应用。Schiborra 等[62]证明了 NIRS 能够运用于预测猪饲粮和粪便的营养成分含量，但是不能预测有机物和 CP 消化率。Zhou 等[63]建立了运用 NIRS 预测玉米干酒糟及其可溶物(DDGS)中猪可消化能和大多数氨基酸含量的快速检测方法。Glecross 等[64]证明了应用 NIRS 预测澳洲肺鱼饲料中可消化蛋白质和能值的可能性。李玉鹏等[65]验证了运用 NIRS 预测棉籽粕营养成分和蛋公鸡代谢能的可行性。Li 等[66]发现 NIRS 能准确检测育肥猪玉米饲料的消化能。

3 小　结

NIRS 应用于动物营养领域在于“包容性”和“时效性”等优点：1）NIRS 能在 2~3 min 测

定出已有模型中的所有指标，效率高。2）利用 NIRS 测定样品指标含量可以不依赖于任何化学试剂，减少化学试剂的使用，经济环保。3）在测定饲料样品时，NIRS 无需对样品进行过多的预处理，可以做到无损检测。4）信息技术与 NIRS 相结合，实时检测，在线上传，品质监控已经可以实现。当然，NIRS 想要进一步推广和使用，需要克服一些缺点：1）在检测样品前期，需要收集大量样品进行模型的建立，工作量比较大。2）模型分析精度依赖于建模时数据的准确性及样品的覆盖度，如果模型建立不准确则无法进行后续分析。3）NIRS 灵敏度只达到千分之一，含量低的成分无法进行分析。4）厂家仪器不同所建模型不同，模型之间的转移问题需要进行深入研究。

参考文献：

[1] 张初,刘飞,孔汶汶,等.利用近红外高光谱图像技术快速鉴别西瓜种子品种[J].农业工程学报,2013,29(20):270–277.

[2] 李军涛.近红外反射光谱快速评定玉米和小麦营养价值的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.

[3] 黄庄荣,沙莎,荣正勤,等.基于近红外技术快速无损分析整粒棉籽中的脂肪酸含量[J].分析化学,2013,41(6):922–926.

[4] 孙宏伟.近红外光谱分析仪器的应用与发展[J].现代仪器,2002,8(5):26–28,25.

[5] LANDAU S,GLASSER T,DVASH L.Monitoring nutrition in small ruminants with the aid of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technology:a review[J].Small Ruminant Research,2006,61(1):1–11.

[6] BENSON I B.含水量的近红外反射(NIR)测量在工业中的应用[J].郑大为,译.国外计量,1992(2):13–15.

[7] 杨琼.近红外光谱法定量分析及其应用研究[D].硕士学位论文.重庆:西南大学,2009.

[8] GARRIDO-NOVELL C,GARRIDO-VARO A,PÉREZ-MARÍN D,et al.Using spectral and textural data extracted from hyperspectral near infrared spectroscopy imaging to discriminate between processed pork,poultry and fish proteins[J].Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2018,172:90–99.

[9] MAGWAZA L S,NAIDOO S I M,LAURIE S M,et al.Development of NIRS models for

rapid quantification of protein content in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) LAM.][J].LWT-Food Science and Technology,2016,72:63–70.

[10] DU G R,MA Y J,LI M,et al.Exploring the use of NIR reflectance spectroscopy in prediction of free *L*-asparagine in solanaceae plants[J].International Journal of Biological Macromolecules,2016,91:426–430.

[11] 刘帅,兴丽,张小燕,等.近红外光谱技术在蛋白质饲料原料检测及溯源方面的研究进展[J].粮食与饲料工业,2016,12(6):68–72.

[12] 陈美君,陈鸿平,丁龙,等.陈皮中 3 种黄酮成分近红外定量分析模型的建立[J].时珍国医国药,2016,27(7):1614–1619.

[13] 赵宁宁,张彩勤,赵勇,等.近红外荧光染料在胃癌人源性肿瘤组织异种移植模型研究中的应用[J].中国实验动物学报,2015,23(6):643–647.

[14] 陈丽菊,刘巍.近红外光谱分析技术及发展前景[J].现代物理知识,2006(2):10–11.

[15] 王正刚.大米保鲜及大米新陈度快速检测技术研究进展[J].粮食加工,2007,32(3):27–30.

[16] 杨芳.近红外光谱分析技术应用[J].中国当代医药,2011,18(1):15–16.

[17] 张瀚文.微型近红外光谱仪探测系统的设计与研究[D].硕士学位论文.上海:复旦大学,2012.

[18] 白扎嘎尔.近红外光谱分析技术(NIRS)在反刍动物饲料分析中的应用研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[19] 陆婉珍,褚小立.近红外光谱(NIR)和过程分析技术(PAT)[J].现代科学仪器,2007(4):13–17.

[20] 李天华.成熟期番茄品质近红外光谱无损检测技术研究[D].博士学位论文.泰安:山东农业大学,2015.

[21] 褚小立,王艳斌,陆婉珍.近红外光谱定量校正模型的建立及应用[J].理化检验:化学分册,2008,44(8):796–800.

[22] 李琼飞,杨增玲,韩鲁佳.反刍动物源肉骨粉的近红外漫反射光谱判别分析[J].光谱学与光谱分析,2008,28(3):572–577.

[23] YANG Z L,HAN L J,LI X,et al.Detecting and quantifying meat meal or meat and bone

meal contamination in fishmeal by visible and near infrared reflectance spectra[J].Animal Feed Science and Technology,2009,147(4):357–367.

[24] 冯莉,王宝瑄,马超.近红外光谱仪对饲料中尿素含量的快速测定[J].养殖技术顾问,2013(7):180.

[25] 孙丹丹,李军国,秦玉昌,等.近红外和中红外光谱技术在快速鉴别豆粕中掺入尿素聚合物的研究[J].动物营养学报,2015,27(4):1199–1206.

[26] GRAHAM S F,HAUGHEY S A,ERVIN R M,et al.The application of near-infrared (NIR) and Raman spectroscopy to detect adulteration of oil used in animal feed production[J].Food Chemistry,2012,132(3):1614–1619.

[27] HAUGHEY S A,GALVIN-KING P,MALECHAUX A,et al.The use of handheld near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the proximate analysis of poultry feed and to detect melamine adulteration of soya bean meal[J].Analytical Methods,2014,7(1):181–186.

[28] 张强.基于近红外光谱技术的稻谷中霉菌和毒素检测研究[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2015.

[29] FERNÁNDEZ-IBAÑEZ V,SOLDADO A,MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ A,et al.Application of near infrared spectroscopy for rapid detection of aflatoxin B1 in maize and barley as analytical quality assessment[J].Food Chemistry,2009,113(2):629–634.

[30] 王旭峰,马冰峰,石磊,等.利用近红外光纤分析技术检测饲料中粗纤维含量[J].食品工业科技,2013,34(2):75–77,82.

[31] 聂志东,韩建国,玉柱,等.FT-NIR 光谱法测定紫花苜蓿青干草的 6 项品质指标[J].光谱学与光谱分析,2007,27(7):1308–1311.

[32] 薛祝林,刘楠,张英俊.近红外光谱法预测紫花苜蓿草捆的营养品质和消化率[J].草地学报,2017,25(1):165–171.

[33] 任卫波,韩建国,张蕴薇,等.近红外光谱紫花苜蓿品种耐盐性鉴别方法研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(2):386–388.

[34] 薛丰,王利,孟庆翔,等.近红外漫反射光谱技术快速预测蒸汽压片玉米常规成分含量的研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):62–64.

[35] 王燕妮,孙琦,肖志明,等.植物源性饲料原料近红外光谱定量分析通用模型研究[J].农产品质量与安全,2016(6):55–58,64.
[36] 刘会影,李国立,薛冬桦,等.近红外光谱法测定玉米秸秆纤维素和半纤维素含量[J].中国农学通报,2013,29(35):182–186.
[37] 刘贤,韩鲁佳.近红外漫反射光谱法快速测定秸秆青贮饲料成分含量[J].光谱学与光谱分析,2006,26(11):2016–2020.
[38] 孙晓荣,刘翠玲,吴静珠,等.近红外漫反射聚类法无损快速测定淀粉品质[J].食品科学技术学报,2010,28(6):53–56.
[39] 杨莉,魏少华,吴建国.用近红外反射光谱法测定乳清粉的品质性状[J].乳业科学与技术,2001,24(3):22–25.
[40] KHALEDUZZAMAN A B M,MAMUN M A A,SALIM H M.Development of local calibrations for the nutritional evaluation of commercial poultry diets by using near infrared reflectance spectroscopy[J].Journal of Applied Animal Research,2017,45(1):8–14.
[41] HETTA M,MUSSADIQ Z,WALLSTEN J,et al.Prediction of nutritive values,morphology and agronomic characteristics in forage maize using two applications of NIRS spectrometry[J].Acta Agriculturae Scandinavica,Section B-Soil & Plant Science,2017,67(4):326–333.
[42] BAGCHI T B,SHARMA S,CHATTOPADHYAY K.Development of NIRS models to predict protein and amylose content of brown rice and proximate compositions of rice bran[J].Food Chemistry,2016,191:21–27.
[43] CHEN J,REN X,ZHANG Q,et al.Determination of protein,total carbohydrates and crude fat contents of foxtail millet using effective wavelengths in NIR spectroscopy[J].Journal of Cereal Science,2013,58(2):241–247.
[44] 姜训鹏,雷恒,李海涛,等.不同饲料原料日粮纤维水平的近红外测定方法[J].农业机械学报,2016,47(增刊):353–358.
[45] 刘玲玲,赵博,张银桥,等.小麦品质近红外检测系统的设计与试验研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(1):92–97.

[46] 车畅.近红外光谱技术在饲料蛋白含量测定中的应用[J].现代畜牧科技,2017(11):21,143.

[47] 李守学,陈玉艳,贾铮,等.饲料添加剂 *L*-赖氨酸硫酸盐中 *L*-赖氨酸含量近红外速测方法研究[J].动物营养学报,2017,29(10):3710–3717.

[48] 黄庄荣.整粒棉籽营养品质的近红外光谱无损分析方法研究[D].硕士学位论文.杭州:浙江大学,2012.

[49] 李楠.利用近红外光谱技术快速检测大豆氨基酸含量及分析其相关性研究[D].硕士学位论文.北京:北京交通大学,2012.

[50] 李军涛.近红外反射光谱快速评定玉米和小麦营养价值的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.

[51] 丁柯,张月敬,沈广辉,等.蛋白饲料原料粗蛋白含量近红外光谱模型转移研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(5):1334–1339.

[52] 刘贤,韩鲁佳,杨增玲,等.基于正交信号校正的秸秆青贮饲料粗蛋白近红外分析模型传递方法[J].分析化学,2012,40(4):596–601.

[53] JOHNSON J R,CARSTENS G E,PRINCE S D,et al.Application of fecal near-infrared reflectance spectroscopy profiling for the prediction of diet nutritional characteristics and voluntary intake in beef cattle[J].Journal of Animal Science,2017,95(1):447–454.

[54] DECRUYENAERE V,FROIDMON E,BARTIAUXTHILL N,et al.Faecal near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) compared with other techniques for estimating the *in vivo* digestibility and dry matter intake of lactating grazing dairy cows[J].Animal Feed Science and Technology,2012,173(3/4):220–234.

[55] DECRUYENAERE V,PLANCHON V,DARDENNE P,et al.Prediction error and repeatability of near infrared reflectance spectroscopy applied to faeces samples in order to predict voluntary intake and digestibility of forages by ruminants[J].Animal Feed Science and Technology,2015,205:49–59.

[56] LYONS G,SHARMA S,AUBRY A,et al.A preliminary evaluation of the use of mid infrared spectroscopy to develop calibration equations for determining faecal composition,intake and digestibility in sheep[J].Animal Feed Science and Technology,2016,221:44–53.

[57] DECRUYENAERE V,LECOMTE P,DEMARQUILLY C,et al.Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS):developing a global calibration[J].Animal Feed Science and Technology,2009,148(2/3/4):138–156.

[58] MEHTIÖ T,RINNE M,NYHOLM L,et al.Cow-specific diet digestibility predictions based on near-infrared reflectance spectroscopy scans of faecal samples[J].Journal of Animal Breeding and Genetics,2016,133(2):115–125.

[59] HASSOUN P,BASTIANELLI D,FOULQUIÉ D,et al.Polyethylene glycol marker measured with NIRS gives a reliable estimate of the rangeland intake of grazing sheep[J].Animal,2015,10(5):771–778.

[60] JANCEWICZ L J,SWIFT M L,PENNER G B,et al.Development of near-infrared spectroscopy calibrations to estimate fecal composition and nutrient digestibility in beef cattle[J].Canadian Journal of Animal Science,2016,97(1):51–64.

[61] VILLAMUELAS M,SERRANO E,ESPUNYES J,et al.Predicting herbivore faecal nitrogen using a multispecies near-infrared reflectance spectroscopy calibration[J].PLoS One,2017,12(4):e0176635.

[62] SCHIBORRA A,BULANG M,BERK A,et al.Using faecal near-infrared spectroscopy (FNIRS) to estimate nutrient digestibility and chemical composition of diets and faeces of growing pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2015,210:234–242.

[63] ZHOU L J,ZHANG L Y,ZHANG E X,et al.Rapid determination of swine available energy and amino acids in corn distillers dried grains with solubles by near-infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and Technology,2012,175(3/4):198–202.

[64] GLENCROSS B,BOURNE N,IRVIN S,et al.Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict the digestible protein and digestible energy values of diets when fed to barramundi,*Lates calcarifer*[J].Aquaculture Nutrition,2017,23(2):397–405.

[65] 李玉鹏,年芳,李爱科,等.近红外反射光谱技术评定棉籽粕营养价值和蛋公鸡代谢能[J].动物营养学报,2016,28(7):2013–2023.

[66] LI J T,LI Q F,LI D F,et al.Use of near-infrared reflectance spectroscopy for the rapid determination of the digestible energy and metabolizable energy content of corn fed to growing pigs[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2017,8(1):48.

Research Progress in Application of Near Infrared Spectroscopy in Animal Nutrition

FENG Dou TENG Zhanwei LIANG Meijuan GAO Tengyun*

(*College of Animal Science and Veterinary Medicine , Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: The traditional method for feed nutrition evaluation is inefficiency. With the development of information technology and the application of chemometric methods, near-infrared spectroscopy (NIRS) has been widely used by domestic and foreign scholars in animal nutrition research for its advantages of convenience, rapidity, and non-destructiveness. In this paper, NIRS was introduced briefly and the application of NIRS to the detection of feed nutrient composition, identification of adulterated feed ingredients and prediction of nutrient digestibility was reviewed, aiming to provide reference for the popularization and application of NIRS in animal nutrition.

Key words: near-infrared spectroscopy; animal nutrition; nutrient composition detection; adulteration identification; digestibility

*Corresponding author, professor, E-mail: dairycow@163.com (责任编辑 陈 鑫)